

高温合金真空低压铸造技术研究进展

马岚波, 税国彦, 苗治全, 孙 逊, 郭新力, 于 波

(沈阳铸造研究所有限公司, 高端装备轻合金铸造技术国家重点实验室, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 高温合金等轴晶铸件广泛应用于航空航天领域, 其结构复杂化、尺寸精确化和薄壁轻质化对高温合金精密铸造技术提出了更高要求。真空低压铸造技术适用于生产优质高温合金复杂薄壁件, 综述了高温合金反重力铸造技术研究现状, 介绍了真空低压铸造技术原理及特点和高温合金真空低压铸造技术在国内的研究进展。

关键词: 高温合金; 反重力铸造; 真空低压铸造; 复杂薄壁铸件

20世纪40年代, 由于航空喷气发动机的发展, 要求制造叶片、叶轮和喷嘴等形状复杂、尺寸精确及表面粗糙度要求较高的耐热合金零件^[1-2], 熔模精密铸件得到广泛应用。

现代熔模精密铸造工艺发展趋势是减少零部件数量, 减轻零件重量, 降低生产制造成本^[3]。美国橡树岭国家实验室和NASA研究中心等对Al系金属间化合物和Ti、Ni基等特种金属的精密铸造进行了大量研究, 他们采用一次成形精密铸造工艺加工涡喷、涡扇导向器, 减少机加工时40%, 成本降低30%^[4]。在国外, CFM56系、JT90D、PW4000、RB211、EJ200等多种军民航空发动机成功应用了大量的高温合金整体精密铸件^[5-6]。CFM56发动机进气机匣外廓尺寸为 $\Phi 1\ 024\ \text{mm} \times 209\ \text{mm}$ 、最小壁厚为2 mm; PW4000系发动机进气机匣附带15个空心支板, 外廓尺寸达 $\Phi 1\ 360\ \text{mm} \times 310\ \text{mm}$ ^[7]。航天发动机进气道是典型的薄壁复杂零件, 应用于某大型航天发动机的K4002合金进气道铸件管型面复杂、管壁薄、壁厚悬殊大^[8]。欧美日等工业发达国家对熔模精密铸造工艺基础理论不断进行完善, 并开发了热控凝固等工艺技术^[9], 复杂高温合金结构件整体精密铸造技术成为国外航空发动机性能提升的有力支撑点。在我国, 虽然熔模铸造工艺不断进步, 但是随着装备制造业的发展, 特别是航空航天、军工、能源等产业的熔模铸造铸件整体、薄壁、复杂和精密化, 传统的熔模精密铸造方法已经不能完全满足复杂铸件成形需求, 复合型精密铸造技术与特种成形工艺设备得到广泛研究与发展, 高温合金真空低压铸造技术即为其中之一。

1 高温合金反重力铸造技术研究现状

国外高温合金反重力铸造技术起步较早, 经过几十年的发展, 技术已经完善与成熟, 多种高温合金反重力铸造技术已经用于批量生产。从20世纪80年代开始, 反重力铸造技术已经用于镍基、铁基和钴基等高温合金。美国Howmet公司^[10]也采用反重力真空铸造技术开发出工业燃气轮机镍基高温合金铸件, 如叶轮、轮盘等。美国Hicthiner公司利用CV (Check Valve止回阀) 法生产了外廓尺寸为 $\Phi 889\ \text{mm} \times 635\ \text{mm}$ 的镍基Inco718扩散器机匣; 利用CLV (the Counter-gravity Low-pressure Vacuum真空反重力低压) 法生产的气轮机燃烧室衬里, 最薄处可达0.38 mm, 氧化物夹杂仅为真空重力熔铸件的15%, 铸件质量优异^[11]。Hebsur等^[12]采用Hicthiner公司反重力铸造工艺成功制备出IN-718格挡铸件 (150 mm \times 300 mm \times 12 mm), 该铸件栅格部分的平均直径1.58 mm, 尺寸误差为0.045 mm。2005年, CLI (the Counter-gravity Low-

作者简介:

马岚波(1994-), 男, 硕士, 主要研究方向为高温合金真空低压铸造工艺。E-mail: malanbol@foxmail.com

通讯作者:

苗治全, 男, 硕士, 硕士生导师。电话: 024-25852311-378, E-mail: miaozq@china-srif.com

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)11-1192-06

收稿日期:

2020-06-30 收到初稿,
2020-08-24 收到修订稿。

pressure In-ert-gas反重力低压惰性气体)工艺被用于生产IN713C、haynes230和Nimonic 90合金的铸件(图1),采用该工艺生产铸件的化学成分、力学性能和微观组织满足或超过铸件的技术条件要求^[13]。

国内高温合金反重力铸造技术的研究起步较晚,目前尚处于应用基础研究阶段,与国外有十五年以上的差距。哈尔滨工业大学^[14]开展了高温合金点阵夹芯板低压熔模铸造工艺数值模拟及真空反重力铸造工艺条件下壁厚与镍基高温合金组织性能和应力影响区的关系研究。上海交通大学^[15-16]在高温合金重力铸造工艺研究的基础上提出采用调压铸造成形高温合金薄壁件,探索了调压铸造用于高温合金复杂薄壁件成形的可行性,并在数值模拟和特征试件铸造实验的基础上提出了航空发动机用高温合金涡轮后机匣支板构件的调压铸造工艺方案。

2 真空低压铸造技术原理及特点

2.1 真空低压铸造技术原理

真空低压铸造技术原理如图2所示。充型前,将铸型室抽真空,控制型腔及金属液中的气体含量,防止铸件内形成气孔;充型时,向卡盘底面与熔化炉之间形成的密闭空间内充入惰性气体,在压力 P 的作用下,

液态金属沿反重力方向压入型腔,通过对充入惰性气体压力参数的调节,可有效地控制充型速度;充型完成时,迅速提高型腔中的压力,使铸件在压力下凝固,提高铸件内部致密度和力学性能;铸件凝固后,卸载气体压力,升液管内未凝金属液返回坩埚内。

2.2 加压速度对金属液流动性及充型能力的影响

液态金属的流动性是指其在标准铸型中流动的最大长度,充型能力是指液态金属充满型腔获得形状完整、轮廓清晰铸件的能力,液态金属充型速度对流动性及充型能力有重要影响。充型速度与坩埚内液面加压速度成正比^[17]。有研究表明,充型速度与液态镁合金流动性在一定范围内呈线性关系^[18]。在A356铝合金的真空低压铸造工艺研究中发现,不同壁厚铝合金的流动性与加压气体流量均呈线性关系^[19]。快速浇注方式能提升Ni₃Al合金薄壁件的充型能力^[20]。另有研究表明,在砂型铸造中,当铸件模数一定时,铝基和铁基合金的流动性与速度成正比^[21]。

真空低压铸造工艺在铸型为真空条件下通过调节卡盘底面与熔化炉之间密闭空间的加压速度与压力大小控制金属液充型过程,从而提高液态金属的充型能力。



(a) IN713C涡轮增压器叶轮 (b) Haynes 230高温探头 (c) Ninonic 90可调涡轮增压器导向叶片
图1 采用 CLI工艺生产IN713C、haynes230和Nimonic 90合金铸件

Fig. 1 IN713C, haynes230 and Nimonic 90 alloy castings produced by CLI process

2.3 凝固压力对铸件凝固组织影响

压力对铸件微观组织形态产生一定的影响^[22]。在压力的作用下,溶质扩散系数降低,降低铸件的偏析程度,同时由于压力提高了熔体的过冷度,提高了凝固速度,使溶质无法及时扩散,形成过饱和固溶体。压力还会将凝固时间最长的熔体挤入枝晶间隙,改变合金的组织形态。在真空差压铸造工艺下,结晶压力对铝合金二次枝晶间距影响明显,壁厚一定时,铝合金二次枝晶间距随着结晶压力增大而减小^[23]。铝合金二次枝晶臂间距愈小,力学性能越高^[24]。国外研究人员发现用真空低压铸造方法比采用传统熔模重力铸造方法得到的ASTM F745不锈钢铸件具有更细小的晶粒

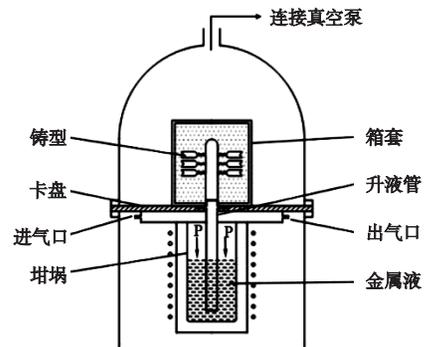


图2 真空低压铸造技术原理图

Fig. 2 Schematic diagram of vacuum low-pressure casting technology

和较小的枝晶间距,具有明显的技术优势^[25]。IN718高温合金在调压铸造工艺下,200 mm×200 mm×1 mm的薄壁铸件的平均晶粒尺寸从500 μm到800 μm不等,平均晶粒尺寸比重力铸造铸件小得多^[26]。熔模铸造高温合金铸件大都存在晶粒粗大、组织不均匀、偏析和缩孔现象,降低疲劳性能和可靠性。真空低压铸造工艺可以在铸件凝固时施加压力,较传统重力浇注方法可得到组织晶粒更为细小的铸件,对提升铸件的力学性能有重要作用。

2.4 凝固压力对铸件内部缩松缩孔的影响

缩松缩孔是常见铸件缺陷之一。高温合金铸件工况苛刻,对缩松级别要求严格。高温合金成分相对复杂,凝固区间大,充型过程中易氧化,热裂缩松倾向大,成形后极易形成显微缩松,影响铸件性能^[27]。

凝固过程中,铸件内部某一部位凝固收缩,未凝固部分金属液在压力作用下克服流动阻力向此部位流动进行补缩,如果压力不足以克服这一压力损失流到需要补缩部位,则凝固部位得不到补缩而产生缩松。如果压力能够克服这一压力损失,凝固部位可以得到金属液的补缩,则不产生缩松或提高缩松等级。宽结晶温度范围合金的补缩过程可以理解为金属液体在枝晶间的流动,如图3所示。

闻星火等人^[28]对铸件凝固过程中金属液流动过程进行了分析,推导出压力条件下的缩松判据:

$$\frac{G_{SC}\sqrt{P_{SC}}}{\sqrt{R_{SC}}} < k_C \quad (1)$$

式中: G_{SC} 为温度梯度, P_{SC} 为实际压力, R_{SC} 为冷却速度, k_C 为缩松判据临界值。从式(1)中可以看出,增大温度梯度和补缩压力,减少冷却速度有助于减少缩松缺陷,在温度梯度与冷却速度相对稳定的条件下,铸件缩松程度受压力影响较大,提高压力有助于金属液的补缩。有研究表明,同重力铸造相比,压力能显著提高液态金属补缩距离,改善补缩特性^[29]。在铝合金的真空差压铸造工艺中,补缩速度与补缩能力与保压压力有关,提高保压压力能使组织更为致密和均匀,有效减少铸件中显微缩松缺陷^[30]。另有研究表明,与重力砂型铸造铸钢件相比,反重力充型并在压力下凝固的砂型铸钢件补缩能力提升,轴线缩松缩孔显著减少甚至消除^[31]。因此,采用真空反重力低压铸造可以通过在铸件凝固阶段施加压力,使铸件在压力下凝固,减少铸件缩松,提高铸件质量。

2.5 真空低压铸造工艺对铸件夹杂缺陷的影响

在真空低压铸造工艺中,升液管一般插到液面以下,能避免大部分外来夹杂物在液态金属充型过程中

卷入铸件,显著减少铸件中的夹杂物,提高铸件质量与成品率。加拿大MCT公司利用CLV法生产的燃气轮机燃烧室衬里,氧化物夹杂较真空重力浇注减少85%,极大提高了铸件质量^[11]。不易发觉的双层氧化膜缺陷广泛存在于镍基高温合金铸件中,不平稳充型是镍基高温合金铸件中产生双层氧化膜缺陷的重要原因^[32]。在高温合金真空低压铸造工艺中,金属液的充型速度可以得到控制,充型过程较为平稳,能减少双层膜氧化物夹杂缺陷。

3 高温合金真空低压铸造技术国内研究进展

目前国内报道的高温合金反重力铸造技术的研究集中在小型特征铸件上,复杂薄壁铸件的应用尚停留在研究阶段^[33]。为了将反重力铸造技术应用于高温合金复杂薄壁铸件,沈阳铸造研究所有限公司研发了高温合金真空低压铸造炉,如图4所示。

3.1 高温合金试件真空低压铸造工艺设计

选择高温合金叶片铸件为试件,轮廓尺寸320 mm×60 mm×30 mm。

根据铸件尺寸和结构特点设计叶片低压铸造工艺,如图5所示。其中的陶瓷隔片用于阻止金属液流

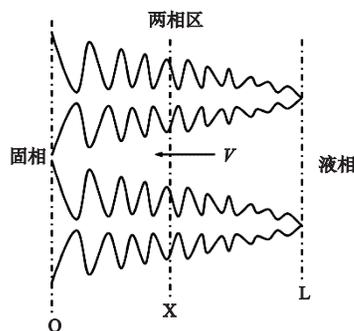


图3 枝晶间渗流模型

Fig. 3 Penetration flow model between the dendritic crystals



图4 高温合金真空低压铸造炉

Fig. 4 Vacuum low pressure casting furnace for superalloys

动，防止铸件因液流交汇而形成冷隔缺陷。叶片右侧的分段设计有考核低压铸造充填性能的目的，通过试件成形完整性验证真空低压铸造工艺。

采用ProCAST软件对叶片铸件低压铸造充型凝固过程进行数值模拟，计算域内材料几何实体模型如图6所示。

计算过程边界条件及初始条件设置如下。

(1) 环境温度：型壳、升液管外表面环境温度为20℃。

(2) 压力参数：加压工艺参数如表1所示。

(3) 界面换热系数：合金与型壳及陶瓷升液管之间设为1 000 W/(m²·K)。

(4) 型壳初始温度1 000℃，陶瓷升液管初始温度300℃，铸件初始充型温度1 480℃。

合金和陶瓷升液管热物性参数采用ProCAST软件材料数据库中默认值替代，型壳热物性参数采用实测值。

叶片铸件充型凝固过程数值模拟结果如图7所示。由图可见，铸件充型完整，在凝固过程中，保压时间约350 s时铸件凝固，升液管内金属尚未凝固（图7e），此时卸压有利于升液管内金属回流。此结果为前文所述的铸件充型凝固过程保压时间参数设置提供了依据。

3.2 工艺试验结果

试验制备型壳如图8所示。型壳预热温度1 100℃，初始充型温度1 480℃，压力参数按数值模拟计算参数设置。试验所得铸件如图9所示，铸件成形完整，完成了工艺验证过程，达到了对研发设备性能验证的目的。

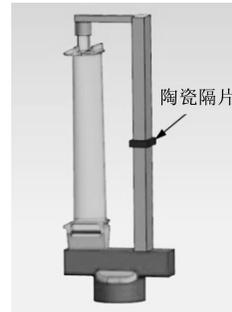


图5 叶片铸件低压铸造工艺

Fig. 5 Low pressure casting process for blade casting

表1 加压工艺参数

Table 1 Pressurizing process parameters

参数	升液	充型	增压	保压
时间/s	3	2	3	350
压力/kPa	50	90	150	150

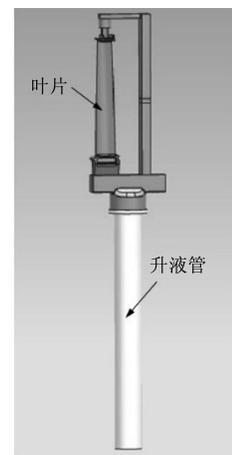


图6 数值模拟用几何实体模型

Fig. 6 Geometry solid model for numerical simulation

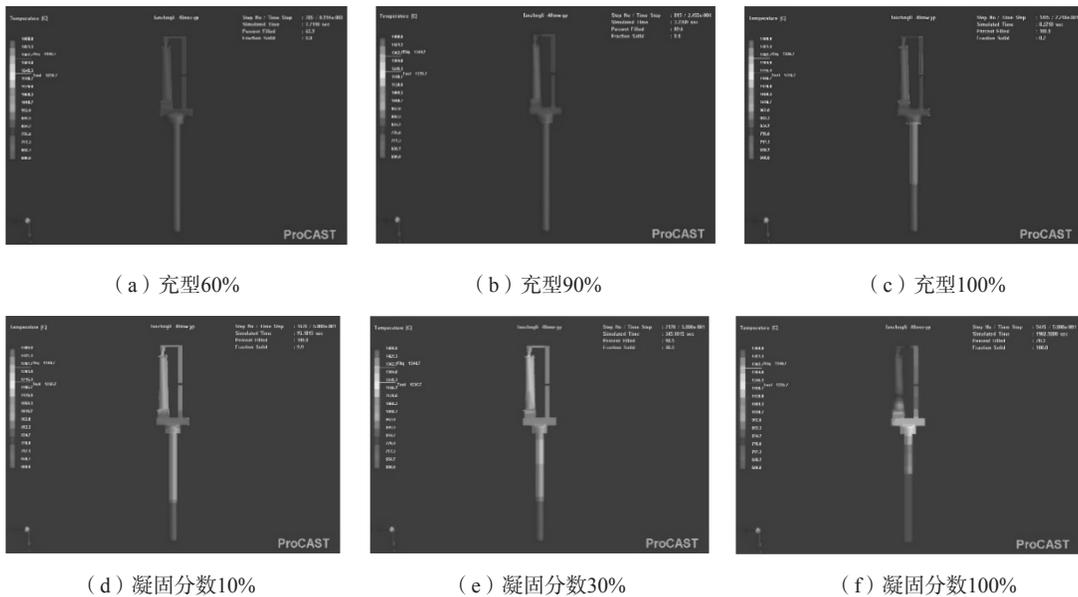


图7 叶片铸件低压铸造充型凝固过程数值模拟结果

Fig. 7 Numerical simulation results of mould filling and solidification process of blade casting manufactured by using low pressure casting technology

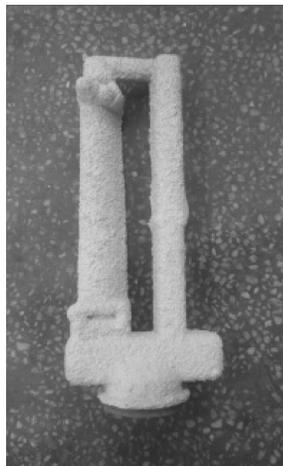


图8 试验所用型壳
Fig. 8 Mould shell for test

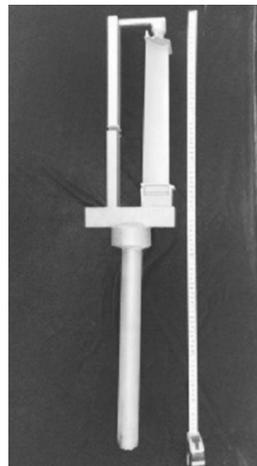


图9 试验所得铸件
Fig. 9 The produced casting

4 结束语

高温合金等轴晶铸件向整体、复杂和薄壁化方向发展,对高温合金铸造技术提出了新挑战,传统单一的熔模铸造技术很难完全满足未来需要,高温合金反重力铸造技术和装备得到广泛关注和迅速发展。国外高温合金反重力铸造技术发展趋于成熟,已应用于批量生产;国内报道的高温合金反重力铸造技术研究尚停留在应用基础探索阶段。沈阳铸造研究所有限公司成功研发出高温合金真空低压铸造炉,将进一步开展离温合金真空低压铸造技术及其应用相关研究。

参考文献:

- [1] 吕志刚. 我国熔模精密铸造的历史回顾与发展展望 [J]. 铸造, 2012, 61 (4): 347-356.
- [2] PATTNAIK S, KARUNAKAR D B, JHA P K. Developments in investment casting process-a review [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212 (11): 2332-2348.
- [3] FÁBIO J B, BRUM, AMICO S C, et al. Microwave dewaxing applied to the investment casting process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209 (7): 3166-3171.
- [4] 曹红锦, 陈毅挺. 国外军工生产精密成型技术的现状及发展趋势 [J]. 兵器装备工程学报, 2004, 25 (3): 8-10.
- [5] MISHRA S, RANJANA R. Reverse solidification path methodology for dewaxing ceramic shells in investment casting Process [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2010, 25 (12): 1385-1388.
- [6] TODOROKI H, OIKAWA M, WANG K, et al. Prospects for the control of solidification structures from the viewpoints of weld, hot-workability and near net shape casting [J]. ISIJ international, 2008, 48 (3): 256-263.
- [7] 樊振中, 徐秀利, 王玉灵. 熔模精密铸造技术在航空工业的应用及发展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34 (3): 285-289.
- [8] 谢秋峰, 吴亚夫, 王倩, 等. K4002 合金异型复杂薄壁进气道铸件的成型工艺研究 [C] //第十三届中国高温合金年会论文集, 北京: 冶金工业出版社, 2015: 286-290
- [9] 彭刚, 董安平, 王俊. 高温合金大型薄壁件熔模精铸技术与发展 [J]. 铸造工程, 2012 (3): 1-4.
- [10] MCQUAYPA, PRCIEA, ROOSAW, et al. The development of a counter-gravity casting process for industrial gas turbine engine components [J]. La Metallurgia Italiana, 2006 (6): 27-31
- [11] Hitchiner Manufacturing Co. Inc. Reactive alloy casting processes [R]. Milford: Hitchiner Manufacturing Co. Inc., 2008.
- [12] M.G. Hebsur, A. Ghosh, T. Sanders, et al. Processing of IN-718 Lattice Block Castings [J]. TMS, 2002: 85-96
- [13] SHENDYE S, KING B, MCQUAY P. Mechanical properties of counter-gravity cast IN718 [A]. Superalloys 718, 625, 706 and Derivatives 2005 [C]. Narrendale, PA: TMS, 2005: 124-133
- [14] 董多. 高温合金点阵夹芯板低压熔模铸造数值模拟 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [15] 余志文. 高温合金薄壁铸件充填特性及铸造工艺的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [16] 闫乃舜. K4169高温合金薄壁铸件调压精密铸造工艺研究 [D]. 上海, 上海交通大学, 2015.
- [17] 刘志明, 王冬. 低压铸造中液态金属的填充规律及其影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 1999 (2): 16-19.
- [18] 刘正, 王中光, 王越, 等. 镁合金压力充型与凝固过程的研究 [J]. 材料研究学报, 1999, 13 (6): 641-644.

- [19] JIANG W M, FAN Z T, LIU D J, et al. Influence of process parameters on filling ability of A356 aluminium alloy in expendable pattern shell casting with vacuum and low pressure [J]. *International Journal of Cast Metals Research*, 2012, 25 (1): 47-52.
- [20] 张喜娥, 李世琼. Ni3Al 基金薄壁精铸件充型过程研究 [C] //仲增墉. 第十一届中国高温合金年会论文集, 北京: 冶金工业出版社, 2008: 586-589.
- [21] HABIBOLLAHZADEH A. Fluidity of Al-and Fe-based eutectic alloys at high velocity in thin sections [D]. University of Birmingham, 2001.
- [22] 梁国宪, 王尔德, 何绍元, 等. 铝合金压力凝固组织特征 [J]. *兵器材料科学与工程*, 1992, 15 (1): 1-5.
- [23] 严青松, 余欢, 芦刚, 等. 结晶压力对真空差压铸造铝合金二次枝晶间距的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2014 (5): 1194-1199.
- [24] TURHAL M Ş, SAVAŞKAN T. Relationships between secondary dendrite arm spacing and mechanical properties of Zn-40Al-Cu alloys [J]. *Journal of materials science*, 2003, 38 (12): 2639-2646.
- [25] GREGORUTTI R W, GRAU J E, ELSNER C I. Microstructural, mechanical and electrochemical characterisation of biomaterial ASTM F745 cast by vacuum [J]. *Materials Science and Technology*, 2012, 28 (6): 742-747.
- [26] DONG A, YAN N, ZHANG J, et al. Investigation of Thin-Walled IN718 Castings by Counter-Gravity Investment Casting [M] // *Advances in the Science and Engineering of Casting Solidification*. Springer, Cham, 2015: 399-406.
- [27] 陈伟, 李长春, 李辉, 等. 铸造工艺对一种铸造高温合金性能及其稳定性的影响 [J]. *铸造*, 2005, 54 (9): 871-874.
- [28] 闻星火. 压力条件下缩松判据的研究 [J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 1998, 38 (8): 54-56.
- [29] 李海兰, 孙逊, 张士彦, 等. 压力对ZCuZn16Si4合金补缩特性的影响 [C] // *先进制造与数据共享国际研讨会*. 2007.
- [30] 严青松, 余欢, 魏伯康, 等. 真空差压铸造工艺的凝固补缩特性与模型 [J]. *中国有色金属学报*, 2008 (6).
- [31] ARCHER L, HARDIN R A, BECKERMANN C. Counter-gravity sand casting of steel with pressurization during solidification [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2018, 12 (3): 596-606.
- [32] 黄爱华, 崔树森, 姜延春. 镍基高温合金铸件中的双氧化膜缺陷 [C] // *第十二届全国铸造年会暨2011中国铸造活动周论文集*. 2011.
- [33] 余志文, 李发国, 张佼, 等. 高温合金大型薄壁铸件反重力铸造技术进展 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2012, 32 (12): 1103-1107.

Research Progress of Vacuum Low Pressure Casting Technology for Superalloys

MA Lan-bo, SHUI Guo-yan, MIAO Zhi-quan, SHUN Xun, GUO Xin-li, YU Bo

(Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., State Key Laboratory of Light Alloy Casting Technology for High-End Equipment, Shenyang 110022, Liaoning, China)

Abstract:

The superalloy equiaxed grain castings are widely applied to aerospace fields. Due to their complicated structure, precise dimension and thin wall thickness as well as light weight, the requirements for the investment casting technologies for superalloys are very high and constantly becoming increasingly strict. The vacuum low pressure casting (VLPC) is appropriate for producing complicated and thin-walled superalloy castings. The paper reviews the present research status of counter-gravity casting (CGC) technology for superalloys both at home and abroad, and introduces the working principle and characteristic of VLPC technology as well as the new research progress of domestic VLPC technology for superalloys.

Key words:

superalloy; counter gravity casting; vacuum low pressure casting; complicated and thin-walled castings